



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**ZADNÍ ODPRUŽENÍ MOTOKROSOVÉHO MOTOCYKLU**

MOTOCROSS MOTORCYCLE REAR SUSPENSION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Tomáš Křivánek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek, Ph.D.

**BRNO 2019**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Tomáš Křivánek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Janoušek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Zadní odpružení motokrosového motocyklu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podvozek je jednou z klíčových součástí motokrosového motocyklu. Popište systémy zadního odpružení motokrosového motocyklu.

### Cíle bakalářské práce:

- proveďte rešerši systémů zadního odpružení používaného u motokrosových motocyklů
- popište konstrukci zadního tlumiče pérování a jeho regulační prvky
- vykreslete charakteristiku mechanismu přepákování vůči zdvihu tlumiče u vybraného motocyklu

### Seznam doporučené literatury:

THEDE, P., PARKS, L.: Race Tech's motorcycle suspension bible. Minneapolis, Minn.: Motorbooks, 2010. ISBN 0760331405.

DIXON, J.: The shock absorber handbook. 2nd ed. Chichester, England: John Wiley, 2007. ISBN 047051700.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Zadní odpružení motocyklu zásadně ovlivňuje jízdní vlastnosti, bezpečnost a pohodlí jezdce. Je důležité se problematikou zadního odpružení zabývat. Bakalářská práce popisuje různá konstrukční uspořádání přepákování, funkci zadního tlumiče, pružení s vinutou a vzduchovou pružinou. Porovnává charakteristiky zadního přepákování u dvou konkrétních motocyklů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

odpružení, tlumič, pružina, vinutá pružina, vzduchová pružina, motokros, tlumení stlačení, tlumení roztahování, přepákování, kavitace, tření

## ABSTRACT

The rear suspension of the motorcycle fundamentally influences the driver's handling, safety and comfort. It is important to address the issue of rear suspension. The bachelor thesis describes various structural arrangements of the linkage, the function of the rear shock, the spring with the coil and the air spring. It compares the characteristics of the linkage in two specific motorcycles.

## KEYWORDS

suspension, shock, spring, coil spring, air spring, motocross, compression, rebound, linkage, cavitation, friction

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘIVÁNEK, T. *Zadní odpružení motokrosového motocyklu*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 32 s. Vedoucí diplomové práce Michal Janoušek.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Janouška, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Tomáš Křivánek

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Michalu Janouškovi, Ph.D. za ochotu a odbornou konzultaci. Dále bych rád poděkoval své manželce a svým rodičům za podporu při studiu.

## OBSAH

Úvod .....	9
1 Funkce zadního odpružení.....	10
1.1 Historie.....	10
1.2 Konstrukční uspořádání .....	11
2 Pružení.....	14
2.1 Lineární pružina.....	14
2.2 Progresivní pružina .....	15
2.3 Vzduchová pružina .....	16
3 Tlumení.....	18
3.1 Princip proudění kapaliny .....	18
4 Tření .....	21
4.1 Statické tření .....	21
4.2 Dynamické tření.....	22
4.3 Viskózní tření.....	22
5 Možnosti nastavení.....	23
5.1 Nastavení předpětí pružiny .....	23
5.2 Nastavení tlumení stlačení .....	24
5.3 Nastavení tlumení roztažení.....	25
5.4 Nastavení velikosti vzduchového zásobníku .....	26
5.5 Nastavení přetlaku ve vzduchovém zásobníku .....	26
6 Konkrétní řešení .....	27
6.1 Charakteristika přepákování u KTM .....	27
6.2 Charakteristika přepákování u Suzuki .....	28
6.3 Porovnání jednotlivých charakteristik .....	28
Závěr.....	29
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	31
Seznam příloh .....	32



## ÚVOD

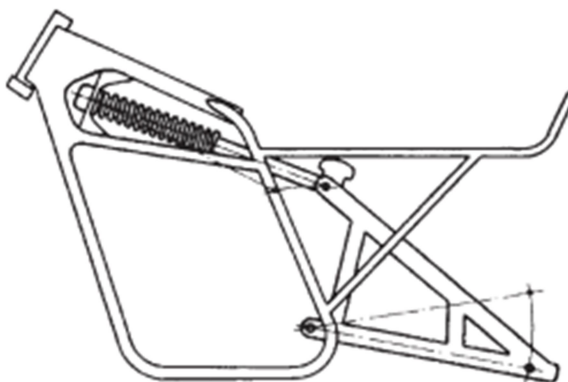
Zadní odpružení je velice důležitou součástí motocyklu. Zásadním způsobem ovlivňuje ovládání motocyklu, bezpečnost jízdy na motocyklu, pohodlí jezdce a další. Neméně důležitým úkolem odpružení je snížení negativního silového namáhání komponentů. Zadní odpružení velice ovlivňuje také trakci motocyklu díky udržení maximálního možného kontaktu kola s podkladem. U motokrosových motocyklů je nedílnou součástí, protože motokrosová motocykly se pohybují po rozmanitém terénu plném různých nerovností, jako jsou tzv. vybrzděné díry na trati, skoky a další. Nároky na motokrosová odpružení jsou velice vysoké. Ideální odpružení by totiž mělo zajistit maximální možný kontakt kola s povrchem ve všech jízdních režimech.

## 1 FUNKCE ZADNÍHO ODPRUŽENÍ

Uchycení zadního kola k motocyklu je vyřešeno pomocí zadní kyvné vidlice. Vidlice je odpružena pomocí jedné centrální tlumičí a pružicí jednotky nebo pomocí dvou tlumících a pružicích jednotek. U moderních terénních motocyklů je používáno pouze řešení s jednou centrální tlumičí a pružicí jednotkou, která je uchycena k vidlici pomocí mechanismu přepákování, což je soustava vahadel. Hřídel zadní vidlice se vyskytuje na spodní zadní straně rámu motocyklu a kyvná vidlice se kolem hřídele otáčí. K uložení vidlice se používají u všech moderních terénních motocyklů jehlová ložiska. [1]

### 1.1 HISTORIE

U prvních terénních motocyklů se zadním odpružením nebylo použito přepákování. Motocykly byly odpruženy pomocí dvou tlumičů uchycených za zadní část kyvné vidlice. Toto řešení ovšem nevyhovovalo potřebám tohoto sportu. Při použití dvou tlumičů je velkým problémem jejich nastavení. Pokud je jeden z nich nastaven nebo namáhán jinak, jinak se také zahřívá a má jiné tlumicí schopnosti. Jiné tlumicí schopnosti vedou ke kroucení kyvné vidlice. Další velikou nevýhodou při použití dvou tlumičů je nedostatečný zdvih zadního kola. Řešením nedostatečného zdvihu se stalo použití jednoho centrálního tlumiče, avšak tlumič musel být bez použití přepákování poměrně dlouhý. Řešení vymyslela firma Yamaha, která tlumič uložila do vrchní části rámu, viz obr. 1.



Obr. 1 Systém zavěšení Cantilever (Yamaha)

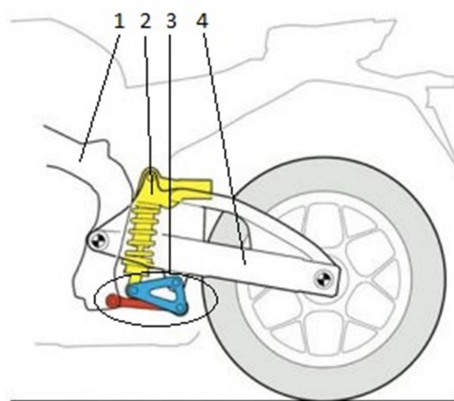
Ukázalo se, že řešení od firmy Yamaha bylo nevhodné. Velkým problémem bylo především vysoko umístěný tlumič, který zapříčinil vysoko posazené těžiště a tím horší jízdní vlastnosti motocyklu. Přibližně v 80. letech 20. století začaly výrobci experimentovat s různými druhy vahadel, které upravují progresivitu chodu a umožňují použití kratšího téměř svisle uloženého tlumiče. Významné japonské firmy přišly každá se svým vlastním řešením, dnes známými jako: Pro Link – Honda, Uni Trak – Kawasaki, Mono Cross – Yamaha, Full Floater – Suzuki. V dnešní době používají všechny firmy u motokrosových motocyklů různé variace systému Pro Link. Různé variace jsou založeny na různých rozměrech vahadel, což ovlivňuje jejich charakteristiku. [1]

## 1.2 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ

V následujících 4 kapitolách budou popsány jednotlivé systémy přepákování.

### 1.2.1 PRO LINK

Systém Pro Link byl vyvinut firmou Honda. Jedná se o systém, kdy je vrchní oko tlumiče uchyceno k rámu a spodní oko tlumiče je uchyceno k jednomu z vahadel, na obr. 2 modré vahadlo. Modré vahadlo je uchyceno jedním čepem ke kyvné vidlici a druhý čepem k druhému vahadlu, na obr. 2 červené vahadlo. Červené vahadlo je již uchyceno k rámu motocyklu. Systém Pro Link je dnes nejvyužívanějším systémem. Na svých motokrosových motocyklech Pro Link používají firmy jako Honda, KTM, Yamaha, TM a další. Každý výrobce sice používá své vlastní nastavení délky vahadel a tedy i různou kinematickou charakteristiku, ale princip zůstává stejný.

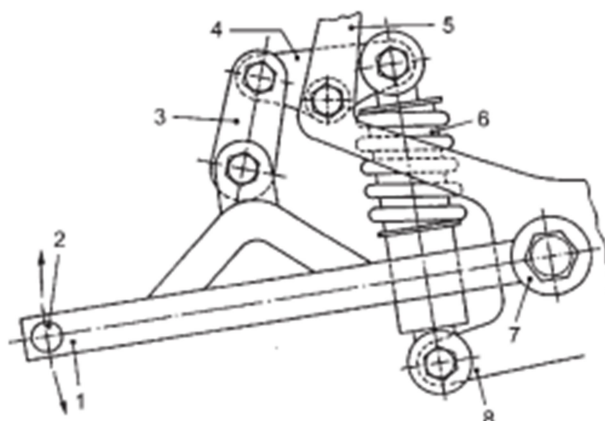


Obr. 2 Systém přepákování Pro Link;

1) rám; 2) tlumič; 3) přepákování; 4) kyvná vidlice [2]

### 1.2.2 UNI TRAK

Uni Trak je systém, který byl vyvinut firmou Kawasaki. Jedná se o systém, kdy spodní oko tlumiče je uchyceno k rámu a vrchní oko tlumiče k vahadlu, bod 4 na obr. 3. Vahadlo je spojeno s kyvnou vidlicí. S rámem je spojeno pomocí vodící páky, bod 3 na obr. 3. Systém byl dále vyvíjen a dnes jeho konstrukční uspořádání odpovídá u motokrosových motocyklů systému Pro Link, viz obr. 4.



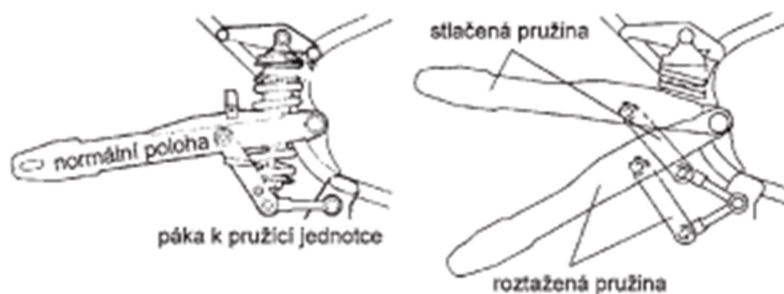
Obr. 3 Systém přepákování Uni Trak [1]



Obr. 4 Současný systém používaný u motocyklů Kawasaki KXF [9]

### 1.2.3 MONO CROSS

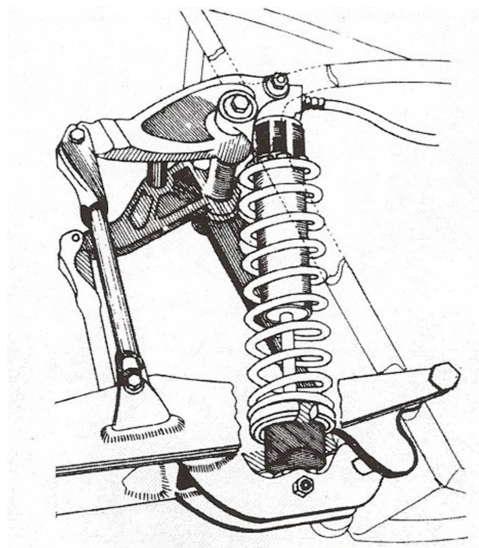
Systém Mono Cross byl vyvinut firmou Yamaha. Tento systém nahradil systém Cantilever, viz obr. 1. U systému Mono Cross je tlumič uchycen vrchním okem k rámu a spodním okem do společného čepu dvou vahadel. Jedno vahadlo je druhým koncem uchyceno ke kyvné vidlici a druhé vahadlo je uchyceno svým druhým koncem k rámu motocyklu. U moderních motokrosových motocyklů ale Yamaha využívá systému Pro Link.



Obr. 5 Systém přepákování Mono Cross [1]

#### 1.2.4 FULL FLOATER

Systém Full Floater byl vyvinut firmou Suzuki. Jedná se o systém, kdy je vrchní oko tlumiče uchyceno stejným způsobem jako u systému Uni Trak a spodní oko tlumiče je uchyceno k vahadlu. Vahadlo je jedním koncem uchyceno ke kyvné vidlici a druhým koncem k rámu motocyklu, viz obr. 6. I Suzuki ale u moderních motokrosových motocyklů využívá systému Pro Link.



*Obr. 6 Systém přepákování Full Floater [8]*

## 2 PRUŽENÍ

Terénní motocykly se pohybují po různých nerovnostech. Vznikající nepříznivé silové působení je nutno omezit, proto se používá pružné spojení kola a motocyklu. Vzniklá kinetická energie se přemění na potenciální energii pružiny, která se následně změní zpět v kinetickou a dojde ke kmitání soustavy. Kmitání soustavy je nutno tlumit, proto se používá kombinace pružiny a tlumiče kmitů.[3]

U moderních terénních motocyklů je pro pružení zadního kola používána vinutá pružina. Vinutá pružina je strojní součást, která umožňuje akumulovat mechanickou energii na základě pružné deformace drátu, ze kterého je vyrobena. [3]

Při stlačení působí pružina silou, která je popsána vztahem [3]:

$$F = K \cdot x \quad (1)$$

K...tuhost pružiny [N/mm]

x...délka stlačení [mm]

Tuhost pružiny může mít dvojí charakteristiku, lineární nebo progresivní.

### 2.1 LINEÁRNÍ PRUŽINA

U lineární pružiny je tuhost dána lineární závislostí. Její tuhost lze vypočítat pomocí následujícího vztahu [6]:

$$K = \frac{d^4 \cdot G}{8 \cdot D^3 \cdot N} \quad (2)$$

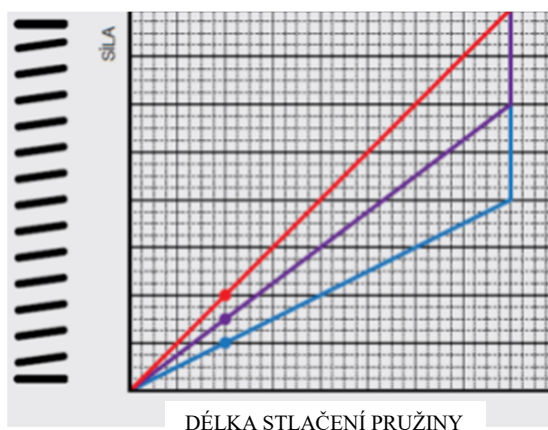
d...průměr drátu pružiny [mm]

G...modul pružnosti ve smyku [MPa]

D...vnější průměr pružiny [mm]

N...počet závitů [-]

Charakteristika délky stlačení pružiny na síle je zobrazena na obr. 7.



Obr. 7 Charakteristika lineární pružiny;  
červená - nejvyšší tuhost; modrá - nejnižší tuhost

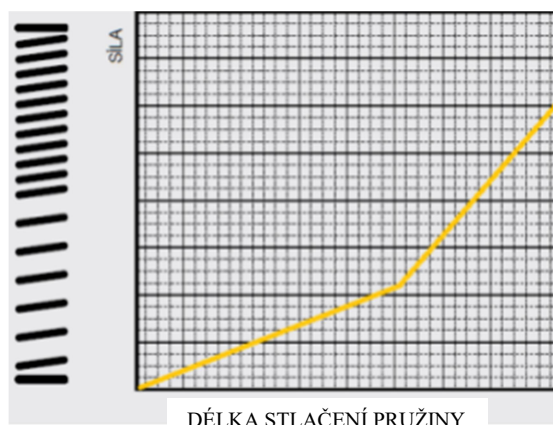
## 2.2 PROGRESIVNÍ PRUŽINA

U progresivní pružiny je tuhost dána jinou než lineární tuhostí. Tuto charakteristiku můžeme vytvořit několika způsoby. První způsob je zařadit za sebe dvě lineární pružiny, kdy celková tuhost se spočítá podle následujícího vztahu:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}$$

(3)

V první fázi se stlačují obě pružiny a celková tuhost je dána podle vztahu 3. Při dosažení maximální stlačení na měkčí pružině se tuhost změní přímo na hodnotu tvrdší pružiny. Dalším způsobem je vytvoření plynule progresivní pružiny. Plynule progresivní pružina může být vytvořena pomocí proměnného stoupání závitů pružiny nebo pomocí proměnného průměru drátu. U zadního odpružení terénních motocyklů se setkáváme pouze s lineárními pružinami, progresivita je dosažena jinými metodami. Charakteristika dvou za sebe zařazených lineárních pružin je na obr. 8. [13]



Obr. 8 Charakteristika progresivní pružiny

## 2.3 VZDUCHOVÁ PRUŽINA

Nedílnou součástí pružení zůstává vzduchový zásobník, viz obr. 2 v kapitole 3. Při stlačení tlumiče dochází ke změně vnitřního objemu kvůli zasunutí pístnice. Objem pístnice je díky kapalině vytlačen právě do vzduchového zásobníku. Změnou objemu se změní tlak v komoře. Změna tlaku je vyjádřena například stavovou rovnicí ideálního plynu [3]:

$$p = \frac{m \cdot r \cdot T}{V} \quad (4)$$

p...tlak plynu [Pa]

m...hmotnost plynu [kg]

r...měrná plynová konstanta [ $\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

T...teplota [K]

V...objem plynu [ $\text{m}^3$ ]

Při uvažování oddělení vzduchové komory od oleje pomocí pístu může být stanovena síla na tento píst v závislosti na dvou polohách tlumiče vztahem [3]:

$$F = p_0 \cdot V_0 \cdot S \cdot (V_0 - S \cdot l)^{-n} - p_a \cdot S \quad (5)$$

$p_0$ ...počáteční tlak v komoře [Pa]

$p_a$ ...atmosférický tlak [Pa]



$V_0$ ...počáteční objem plynu [ $\text{m}^3$ ]

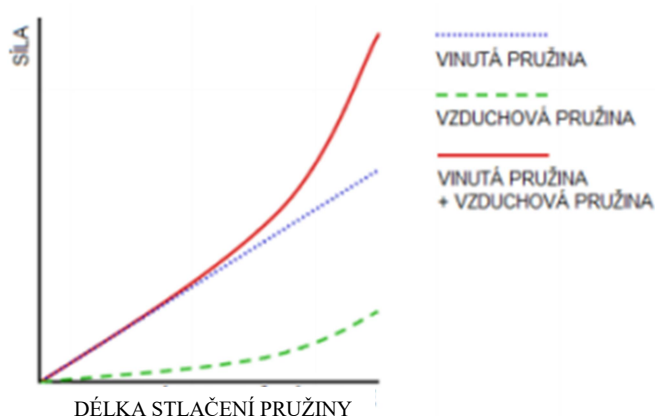
$S$ ... plocha pístu [ $\text{m}^2$ ]

$n$ ... polytropický exponent [-]

$l$ ... délka stlačení pístu [m]

Závislost síly na délce stlačení pístu je mocninná a vyjadřuje její charakteristiku. Z rovnice je možné určit i parametry, kterými lze tuto charakteristiku ovlivnit. Charakteristiku lze ovlivnit zejména změnou velikosti počátečního objemu a změnou počátečního tlaku. Ostatní parametry lze změnit pouze změnou konstrukce celého tlumiče.

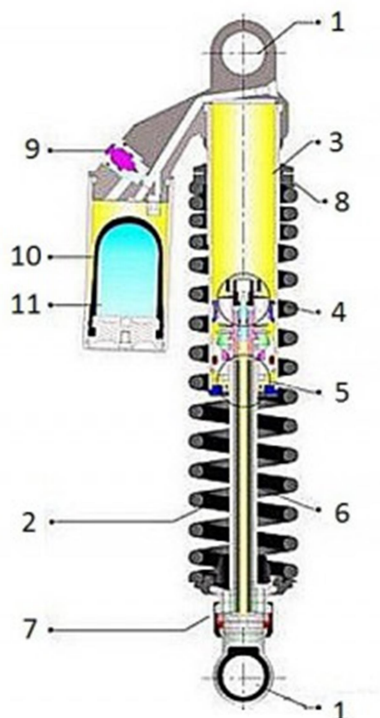
U tlumiče se setkáváme s kombinací těchto dvou charakteristik, protože součástí tlumiče je vzduchová komora i lineární pružina. Charakteristika délky stlačení a síly u kombinace vzduchové pružiny a lineární pružiny je zobrazena na obr. 9. [13]



Obr. 9 Charakteristika kombinace vzduchové pružiny a lineární pružiny

### 3 TLUMENÍ

U terénních motocyklů je k tlumení použit vždy kapalinový teleskopický tlumič s expanzní nádobkou. Kapalinový tlumič tlumí nepříznivé kmitání neodpružených hmot a tím zvyšuje kontakt kola s vozovkou. Současně tlumí i kmitání odpružených hmot a tím přispívá k jízdnímu komfortu. Jednotlivé části tlumiče jsou popsány na obr. 10. Tlumiče jednotlivých výrobců se liší v použitých materiálech, rozměrech jednotlivých součástí, ale princip zůstává stejný.



Obr. 10 Hydraulický tlumič s expanzní nádobou;

- 1) ložisko; 2) vinutá pružina; 3) hydraulická kapalina; 4) střední píst; 5) těsnění;  
6) pístnice; 7) nastavení roztažení; 8) nastavení předpětí pružiny; 9) nastavení stlačení;  
10) membrána; 11) vzduchový zásobník [4]

Tlumič je uchycen dvojicí šroubů. Jedním šroubem je uchycen k rámu motocyklu a druhým k přepákování. Šrouby v obou případech prochází rozpěrným okem, které je uloženo v kluzném ložisku umožňujícím mírné výkyvy. Uložení vyrovnává nepřesnosti vzniklé ve výrobě, montáži nebo provozu. [1]

#### 3.1 PRINCIP PROUDĚNÍ KAPALINY

V kapalinovém tlumiči proudí tlumicí kapalina, která díky svému viskóznímu a smykovému tření mění kinetickou energii na teplo. Kapalina prochází systémem kanálků, které omezují její průtok. Vzniklý odpor je tlumicí silou. Průtočná plocha není konstantní, protože tlumicí síla by byla při pomalých pohybech pístu nedostatečná a naopak při rychlých pohybech pístu by byla příliš velká. Regulování průtoku je řešeno planžetami, které kanálky těsní. Při pohybu

pístu roste přetlak nad pístem, protože kanálky jsou utěsněny planžetami. Na planžety působí síla. Při dostatečně velké síle se planžety ohnout a otevřou se kanálky. Se stále rostoucí silou roste i deformace planžet a roste průtočná plocha. Výsledná tlumicí síla je tedy tvořena součtem odporu kapaliny a odporu planžet.

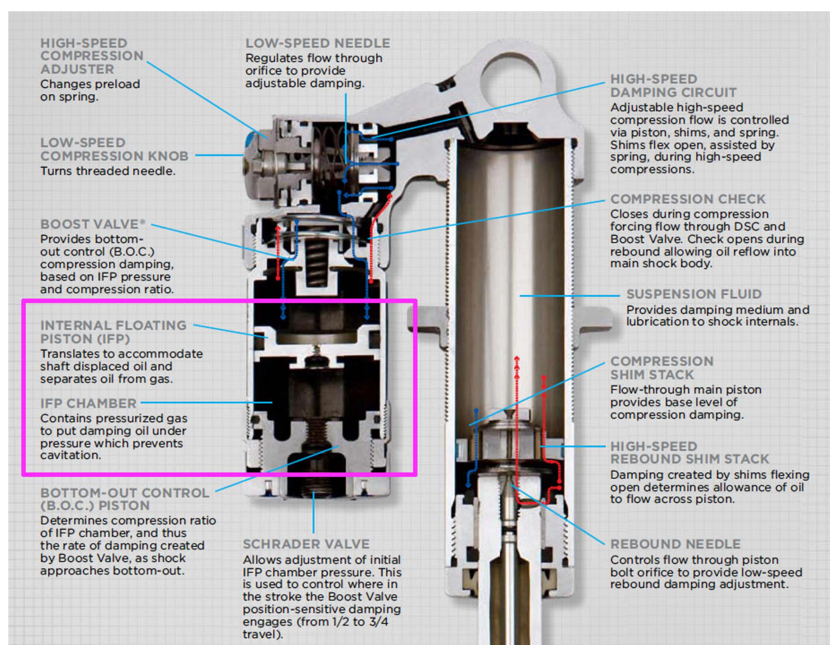
Tlumením dochází k přeměně kinetické energie na tepelnou, tento jev se nazývá disipace energie. Při stlačení tlumiče energie se tedy část energie uloží do pružiny jako potenciální energie a část energie se vyzáří v podobě tepla. Tlumení tedy ovlivňuje délku stlačení kyvné vidlice.

### 3.1.1 TLUMENÍ STLAČENÍ

Tlumení stlačení je velmi komplexní problém. Při motokrosu musí být tlumič schopen tlumit velmi rozdílné rázy. Rázy vznikají díky různorodosti terénu.

Pro popis tlumení byl vybrán obr. 11, který zobrazuje řez tlumičem sjezdového kola s označením FOX DHX RC4. Tento tlumič je konstrukčně shodný s motokrosovým tlumičem. Rozdíly v konstrukci jsou dva. Prvním rozdílem je možnost nastavení Bottom-out, které u motokrosového tlumiče chybí, a druhým rozdílem je chybějící Boost valve u motokrosových tlumičů.

Při tlumení stlačení protéká tlumicí kapalina ve směru modrých šipek. Základním parametrem je protékání přes střední ventil, na obr. 11 zobrazeno jako Compression Shim Stack, na obr. 10 v kapitole 3 zobrazeno jako bod 4, střední píst. Kanálky ve středním pístu jsou těsněny planžetami, které konají funkci proměnlivého tlumení, viz kap. 3.1. Druhým místem, kudy olej protéká, je nastavovací ventil, na obr. 10. v kapitole 3 zobrazeno jako bod 9, nastavení stlačení. Na obr. 11 je zobrazen podrobněji. Olej zde protéká okolo jehly, označena jako Low-speed needle. Okolo této jehly protéká olej při pomalých pohybech pístu. Zasunutí jehly ovlivňuje průtočnou plochu. Jehla se dá regulovat šroubem, viz obr. 11, low-speed compression knob. Při vyšších rychlostech pohybu pístu nestačí tento průtok a olej začne téct okruhem značeným na obr. 11, high-speed damping circuit. Průtok těmito kanálky je těsněn planžetou, která je přitlačena pružinou. Předpětí této pružiny se dá nastavit šroubem, viz obr. 8, high-speed compression adjuster. Kapalina tlačí na plovoucí píst, obr. 11, internal floating piston, který odděluje prostor s olejem od prostoru vzduchového zásobníku, obr. 11, IFP chamber. V některých případech zde není použit píst, ale gumový vak, který plní stejnou funkci. Prostor vzduchového zásobníku se zmenšuje a vytváří se zde přetlak, jak je popsáno v kapitole 2.2. U tlumiče pro sjezdová kola FOX DHX RC4 se zde objevuje právě nastavení bottom-out, které mechanicky mění velikost vzduchového zásobníku. U motokrosových motocyklů se velikost zásobníku mění pouze změnou množství oleje, viz kapitola 5. Ve vzduchovém zásobníku se objevuje většinou čistý dusík, v některých případech je ale nahrazen atmosferickým vzduchem, který je přibližně ze 75 % tvořen právě dusíkem. Tlumič se plní přes ventil, viz obr. 11, schrader valve.



Obr. 11 Řez tlumičem sjezdového kola [7]

### 3.1.2 TLUMENÍ ROZTAŽENÍ

Tlumení roztažení je méně komplikované oproti tlumení stlačení. Tlumení roztažení je tlumení nahromaděné energie v pružině a vzduchovém zásobníku, proto jsou zde jasné vstupní podmínky a je možné jednodušeji určit správné nastavení. Při tlumení roztažení olej protéká ve směru červených šipek, viz obr. 11 v kapitole 3.1.1. Průtok je regulován pouze v místě plovoucího pístu. Při malém zasunutí pístu a zpětném roztažení olej protéká okolo jehly, viz obr. 8, rebound needle. Zasunutí této jehly je regulováno šroubem, viz obr. 10 v kapitole 3. Při větším zasunutí a opětovném roztažení tlumiče vzroste tlak oleje natolik, že se planžety roztažení prohnou a otevřou kanálky v plovoucím pístu, viz obr. 8 high-speed rebound shim stack.

### 3.1.3 KAVITACE

Velkým problémem u problematiky hydraulických tlumičů je kavitace. Kavitace vzniká při velkých rychlostech stlačení, případně roztažení. Jedná se o jev, kdy v kapalině vznikají a zanikají dutinky vlivem snížení tlaku na tlak nasycených par. Výskytem dutin tlumič ztrácí schopnost tlumit, protože je přepuštěno nedostatečné množství tlumicí kapaliny přes píst. U zadních tlumičů motokrosových motocyklů je kavitace ošetřena přetlakem v celém tlumiči v kombinaci s určením limitního nastavení tak, aby nedocházelo ke kavitaci. [3]

### 3.1.4 KAPALINA V TLUMIČI

U motokrosových motocyklů je použit jako tlumicí médium speciální tlumičový olej. Nejdůležitějším parametrem je jeho viskozita, která přímo ovlivňuje odpor proti proudění. Viskozita se mění s teplotou, proto je třeba využívat oleje určené speciálně pro tlumiče.

## 4 TŘENÍ

Účelem tlumiče je vytvoření kontroly nad disipací energie. V tlumiči vzniká více druhů tření. Největší podíl na disipaci energie má viskózní tření. Viskózní tření vzniká v kapalině a přímo jej určuje geometrie průtočných kanálků, síla planžet a další komponenty. Dalšími druhy tření, která se vyskytují u zadního odpružení, jsou statické tření, dynamické tření a tření v ložiskách přepákování a uložení tlumiče.

### 4.1 STATICKÉ TŘENÍ

Statické tření je síla působící proti vzájemnému pohybu dvou těles. Vzniká s působením boční síly a je jí rovna. Maximální třecí síla je dána vztahem:

$$F_T = \mu \cdot F_N \quad (6)$$

$F_T$ ...třecí síla

$\mu$ ...koeficient statického tření

$F_N$ ...normálová síla

Při překonání maximální třecí síly se dvě tělesa začnou pohybovat vůči sobě. Statické tření je velmi nepříznivé pro zadní odpružení motocyklu. Musí se totiž překonat na začátku každého pohybu. Výrobci se snaží tuto sílu co nejvíce zmenšit. Statické tření se dá například zmenšit množstvím kontaktních ploch v tlumiči, povrchovými úpravami dotýkajících se povrchů.

## 4.2 DYNAMICKÉ TŘENÍ

Při překonání statické třecí síly se dvě tělesa začnou pohybovat a začne působit dynamické tření. Dynamické tření je nižší než statické tření, tzn. Síla potřebná k udržení smýkavého pohybu je nižší než síla potřebná k jeho vyvolání. Tento jev je zapříčiněn překonáním setrvačné síly na začátku pohybu. Ve výpočtu se jev projeví zvětšeným součinitelem tření. [3]

## 4.3 VISKÓZNÍ TŘENÍ

Viskózní tření vzniká díky rozdílným rychlostem jednotlivých pohybujících se vrstev v kapalině. Při nulové rychlosti je rovno nule a s rostoucí rychlostí také roste. Síla je vyjádřena pomocí vztahu:

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

$\eta$ ...dynamická viskozita [ $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$A$ ...konstantní plocha vrstev [ $\text{m}^2$ ]

$dv/dt$ ...gradient rychlosti [ $\text{s}^{-1}$ ]

## 5 MOŽNOSTI NASTAVENÍ

Nastavení tlumičů je možné provádět v rozsahu stanoveného dle výrobce. Rozsah je u všech výrobců dostatečně široký, aby bylo možné nastavit motocykl jak pro amatérské jezdce, tak pro profesionální jezdce. Velice důležitým faktorem pro nastavení je zvolení správné tuhosti pružiny. Tuhost pružiny doporučuje každý z výrobců v manuálu, avšak někteří jezdci experimentují a nedrží se tuhostí doporučených výrobcem.

### 5.1 NASTAVENÍ PŘEDPĚTÍ PRUŽINY

Předpětí pružiny se nastavuje maticí, která je zobrazena na obr. 10 v kapitole 3, nastavení předpětí pružiny. Nastavuje se na hodnotu tzv. SAG, což je prověšení zadního kola při zatížení jezdce. Správné hodnoty SAG udává výrobce. Hodnota SAG ovlivňuje nejen charakteristiku tlumiče, ale také geometrii celého motocyklu. Nastavení probíhá tak, že se měří vzdálenost mezi středem kola a pevným bodem na motocyklu, například hrana plastu zadního blatníku, při různých zatížení, viz obr. 12. Měřeny jsou 3 hodnoty. Hodnota A je při odlehčeném motocyklu, hodnota B je při motocyklu stojícím na zemi bez jezdce a hodnota C je při zatížení jezdce. Hodnotí se statické prověšení  $S_1$  a prověšení při jízdě nebo-li prověšení při zatížení jezdce J:

$$S_1 = A - B \quad (8)$$

$$J = A - C \quad (9)$$

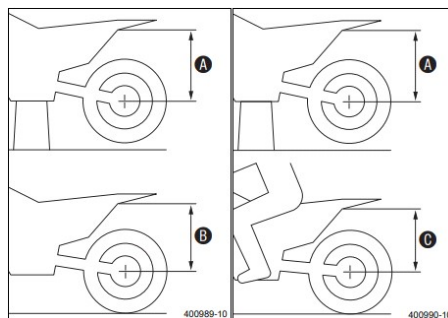
S...statické prověšení [mm]

J...prověšení při zatížení jezdce [mm]

A...naměřená vzdálenost při odlehčeném motocyklu [mm]

B...naměřená vzdálenost při motocyklu stojícím na zemi bez jezdce [mm]

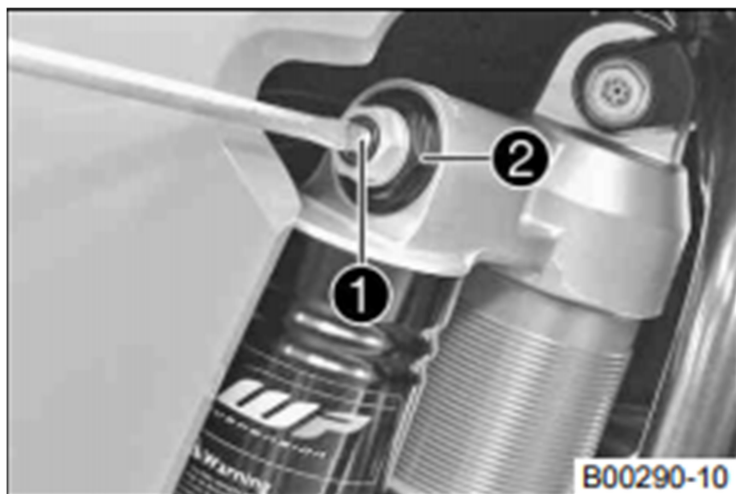
Statické zatížení i prověšení při jízdě je dáno výrobcem v manuálu. Statické prověšení se běžně pohybuje okolo 10 % celkového zdvihu zadního kola, prověšení při zatížení jezdce se pohybuje okolo 30 % zdvihu zadního kola.



Obr. 12 Postup pro změření SAG [14]

## 5.2 NASTAVENÍ TLUMENÍ STLAČENÍ

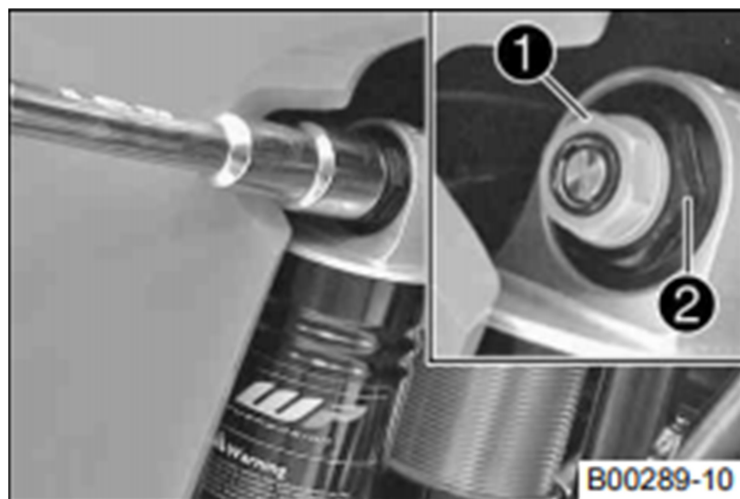
Tlumení stlačení se nastavuje ve dvou rychlostních stupních. Pomalé tlumení stlačení nastává v situacích, kdy motocykl přejíždí zaoblené hrany. Nastavuje se šroubem, viz 1 na obr. 13. Poloha šroubu se určuje podle počtu cvaknutí při otáčení šroubu. Šroub má zpravidla 20 až 40 poloh. Výrobce předepsané nastavení bývá většinou v polovině tohoto rozsahu.



Obr. 13 Nastavení pomalého tlumení stlačení [14]



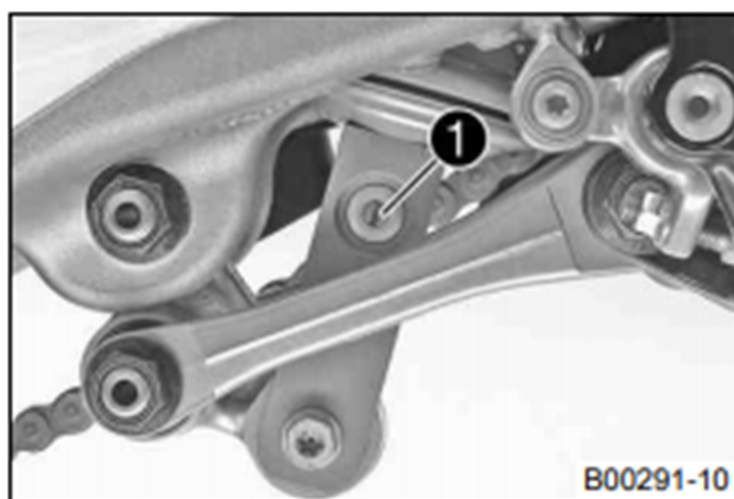
Rychlé tlumení stlačení nastavává při přejezdu nerovností s ostrými hranami. Nastavuje se šroubem, který předepne pružinu tlačící na planžetu, viz 1 na obr. 14. Poloha je většinou určena počtem otáček šroubu. Rozsah otáček bývá 4, výrobcem předepsané nastavení bývá v polovině rozsahu.



Obr. 14 Nastavení rychlého tlumení stlačení [14]

### 5.3 NASTAVENÍ TLUMENÍ ROZTAŽENÍ

Roztažení je nastavováno pouze jedním šroubem, viz 1 na obr. 15. Šroub má zpravidla 20-40 poloh. I v tomto případě platí, že standardní nastavení doporučené výrobcem je zhruba v polovině tohoto rozsahu.



Obr. 15 Nastavení tlumení roztažení [14]

## **5.4 NASTAVENÍ VELIKOSTI VZDUCHOVÉHO ZÁSObNÍKU**

Velikost vzduchového zásobníku se u motokrosovéch tlumičů nedá nastavit přímo, ale nastavuje se pomocí změny hladiny oleje v tlumiči. Při zvýšení hladiny oleje se velikost vzduchového zásobníku zmenší a tlumič má více progresivní chod, viz kapitola 2.2. Nastavení velikosti vzduchového zásobníku není příliš využíváno, protože při špatném nastavení může vést až k destrukci tlumiče. Množství kapaliny v tlumiči a tedy i hladina oleje je opět dána výrobcem.

## **5.5 NASTAVENÍ PŘETLAKU VE VZDUCHOVÉM ZÁSObNÍKU**

Nastavení přetlaku v komoře je dáno výrobcem. Výrobce nedoporučuje měnit tuto hodnotu, protože by mohlo dojít ke kavitaci při použití příliš nízkého tlaku nebo k destrukci tlumiče při použití příliš vysokého tlaku. Přetlak ve vzduchové komoře bývá 10 až 14 bar.

## 6 KONKRÉTNÍ ŘEŠENÍ

Pro bakalářskou práci byly vybrány dva konkrétní motocykly a byly změřeny jejich charakteristiky zdvihu kola vůči zdvihu tlumiče. Pro změření byly vybrány motocykly se stejným rozvorem kol, tj. vzdálenost os předního a zadního kola, a se stejným maximálním zdvihem zadního kola. Byly změřeny délky jednotlivých vahadel. Kvůli nedostatečné přesnosti měření jednotlivých vahadel bylo rozhodnuto pro přímou metodu měření zdvihu zadního kola a stlačení tlumiče. Jednotlivé hodnoty byly zapsány do tabulky, viz příloha 1, a následně zaneseny do grafu 1. Nulové hodnoty znamenají maximální roztažení tlumiče, případně maximální zdvih zadního kola.

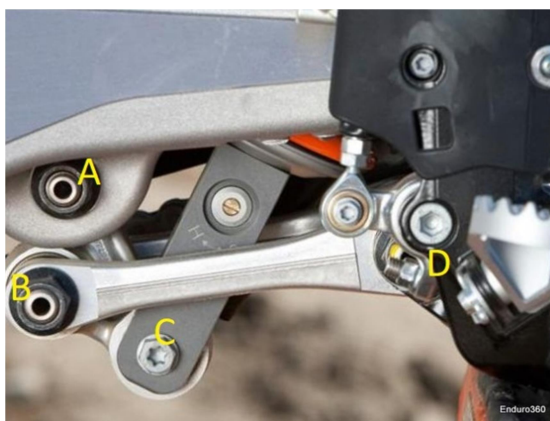
### 6.1 CHARAKTERISTIKA PŘEPÁKOVÁNÍ U KTM

Pro změření charakteristik byl vybrán motocykl KTM SXF 450 modelový rok 2012, viz obr. 16. KTM používá přepákování typu Pro Link. Nejdříve byly označeny jednotlivé čepy, viz obr. 17, a následně změřena jejich vzájemná vzdálenost. U KTM byly naměřeny následující hodnoty:

$AB = 49 \text{ mm}$ ;  $AC = 76 \text{ mm}$ ;  $BC = 44 \text{ mm}$ ;  $BD = 146 \text{ mm}$ .



Obr. 16 KTM SXF 450 r.v. 2012 [10]



Obr. 17 Přepákování s označenými čepy [12]

## 6.2 CHARAKTERISTIKA PŘEPÁKOVÁNÍ U SUZUKI

Jako druhý motocykl byl vybrán motocykl Suzuki RMZ modelový rok 2012, viz obr. 18. Suzuki také používá přepákování tipu Pro Link ale s jinými délkami vahadel. Vzhledem ke stejné konstrukci přepákování byly pouze naměřeny hodnoty:

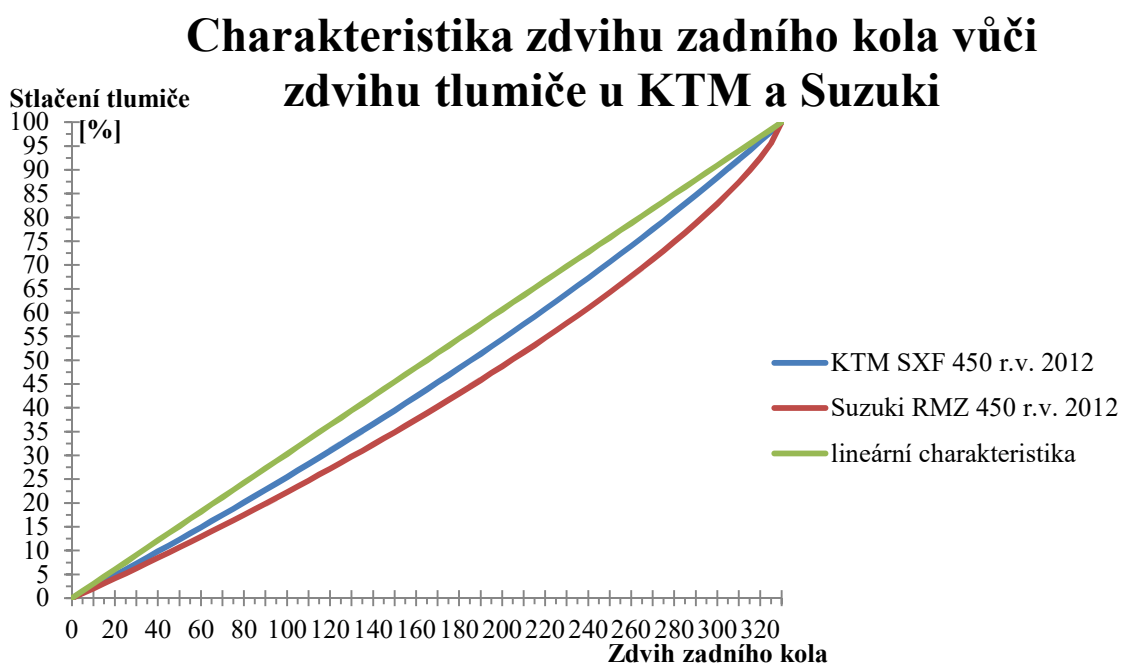
$AB = 41 \text{ mm}$ ;  $AC = 71 \text{ mm}$ ;  $BC = 68 \text{ mm}$ ;  $BD = 136 \text{ mm}$ .



Obr. 18 Suzuki RMZ 450 r.v. 2012 [11]

## 6.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH CHARAKTERISTIK

Porovnáním naměřených hodnoty byly zjištěny velké rozdíly v délkách vahadel. Rozdíly mají za následek rozdílné charakteristiky. Pro porovnání byla do grafu ještě vynesena lineární závislost zdvihu zadního kola na procentuálním stlačení tlumiče. Z grafu je jasně patrné, že oba výrobci používají progresivní nastavení přepákování. Progresivní systém znamená, že při rostoucím stlačení zadního kola roste změna stlačení tlumiče. Suzuki je tedy více progresivní než KTM.



## ZÁVĚR

U moderních motokrosových motocyklů různorodost přepákování a použitých tlumičů prakticky vymizela a zaměřila se na odladování jednoho systému, kterým je Pro Link. Jako pružicí jednotka je využívána kombinace lineární pružiny a vzduchové pružiny. Jako tlumicí jednotka je využíván hydraulický tlumič kmitů s expanzní nádobkou. Každý výrobce upravuje vahadla přepákování podle svých zkušeností a preferencí. Odchytky jednotlivých výrobců v délkách vahadel jsou značné a zásadně ovlivňují celkovou charakteristiku zadního odpružení.

Správné nastavení zadního odpružení je komplexní téma, které je potřeba konzultovat s odborníky a dodržovat určité rady výrobců. Ve všech případech je k dispozici tovární nastavení všech nastavovacích prvků motocyklů pro různé váhy jezdců.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] VLK, František. *Rámy a odpružení motocyklů* [online]. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-03-159-177.pdf>
- [2] BURNS, John. What Is A Linkage Suspension And Why Would I Need One? - Ask MO Anything. [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.motorcycle.com/ask-mo-anything/the-missing-linkage.html>
- [3] KUČERA, Vlastimil. *Konstrukce předního odpružení motokrosového motocyklu* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=149489](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149489)
- [4] JANOUSEK, Marek. *Teorie odpružení motocyklu* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.motorkari.cz/clanky/jak-na-to/teorie-odpruzeni-motocyklu-36350.html>
- [5] *Shock Explanation* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.motorcyclemetal.com/gpage26.html>
- [6] SHIGLEY, J. E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [7] *Suspension Tech: What's an IFP? - Bikerumor*. [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://bikerumor.com/2017/07/06/suspension-tech-whats-ifp/>
- [8] *The Bikes That Changed Motocross* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://pulpmx.com/2012/02/22/the-bikes-that-changed-motocross/>
- [9] *061416-2017-kawasaki-kx450f\_DSC5567-linkage - Motorcycle.com* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.motorcycle.com/manufacture/kawasaki/2017-kawasaki-kx450f-first-ride-review.html/attachment/061416-2017-kawasaki-kx450f-dsc5567-linkage>
- [10] *2012 KTM 450 SX-F* [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: [https://bikez.com/motorcycles/ktm\\_450\\_sx-f\\_2012.php](https://bikez.com/motorcycles/ktm_450_sx-f_2012.php)
- [11] *2012 Suzuki RM-Z450 Review* [online]. [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://www.totalmotorcycle.com/motorcycles/2012models/2012-Suzuki-RMZ450>
- [12] *KTM Suspension - PDS versus Linkage* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.enduro360.com/2012/03/21/featured/ktm-suspension-pds-versus-linkage/>
- [13] THEDE, P., PARKS, L. *Race Tech's motorcycle suspension bible*. Minneapolis, Minn.: Motorbooks, 2010. ISBN 0760331405
- [14] *Uživatelský manual* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://www.ktm.com/globalassets/product-manuals-pim-data/dok\\_bike\\_bed\\_12\\_3211717\\_cs\\_om\\_scs\\_cz\\_aepi\\_v1.pdf](https://www.ktm.com/globalassets/product-manuals-pim-data/dok_bike_bed_12_3211717_cs_om_scs_cz_aepi_v1.pdf)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\mu$	[-]	Koeficient statického tření
$\eta$	[Pa·s <sup>-1</sup> ]	Dynamická viskozita
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Konstantní plocha vrstev
$d$	[mm]	Průměr drátu pružiny
$D$	[mm]	Vnější průměr pružiny
$dv/dt$	[s <sup>-1</sup> ]	Gradient rychlosti
$F_N$	[N]	Normálová síla
$F_t$	[N]	Třecí síla
$G$	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
$K$	[N·mm <sup>-1</sup> ]	Tuhost pružiny
$K_1$	[N·mm <sup>-1</sup> ]	Tuhost pružiny 1
$K_2$	[N·mm <sup>-1</sup> ]	Tuhost pružiny 2
$l$	[m]	Délka stlačení pístu
$m$	[kg]	Hmotnost plynu
$N$	[-]	Počet závitů
$n$	[-]	Polytropický exponent
$p$	[Pa]	Tlak plynu
$P_0$	[Pa]	Počáteční tlak v komoře
$p_a$	[Pa]	Atmosférický tlak
$r$	[J·kg·K <sup>-1</sup> ]	Měrná plynová konstanta
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha pístu
$T$	[K]	teplota
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem plynu
$V_0$	[m <sup>3</sup> ]	Počáteční
$x$	[mm]	Stlačení pružiny
$S_l$	[mm]	Statické prověšení
$J$	[mm]	Prověšení při zatížení jezdce
$A$	[mm]	Naměřená vzdálenost při odlehčeném motocyklu
$B$	[mm]	Naměřená hodnota při motocyklu stojícím na zemi bez jezdce
$AB, AC, BC, BD$	[mm]	Vzdálenost mezi čepy

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Tabulka hodnot stlačení zadního kola a tlumiče



KTM SXF 450 r.v. 2012			Suzuki RMZ 450 r.v. 2012		
Zdvih kola [mm]	Stlačení tlumiče [mm]	Stlačení tlumiče [mm]	Zdvih kola [mm]	Stlačení tlumiče [mm]	Stlačení tlumiče [mm]
0	0,0	0,000	0	0,0	0,000
5	1,3	1,198	5	1,6	1,026
10	2,6	2,405	10	3,3	2,061
15	3,9	3,619	15	5,0	3,105
20	5,3	4,840	20	6,7	4,160
25	6,6	6,070	25	8,4	5,222
30	7,9	7,307	30	10,1	6,294
35	9,3	8,552	35	11,8	7,375
40	10,6	9,804	40	13,6	8,466
45	12,0	11,065	45	15,3	9,565
50	13,4	12,333	50	17,1	10,674
55	14,8	13,609	55	18,9	11,791
60	16,2	14,894	60	20,7	12,918
65	17,6	16,186	65	22,5	14,054
70	19,0	17,485	70	24,4	15,199
75	20,4	18,794	75	26,2	16,354
80	21,8	20,110	80	28,1	17,518
85	23,3	21,436	85	30,0	18,692
90	24,7	22,768	90	31,9	19,875
95	26,2	24,110	95	33,8	21,068
100	27,6	25,459	100	35,7	22,271
105	29,1	26,818	105	37,7	23,484

110	30,6	28,186	110	39,6	24,706
115	32,1	29,562	115	41,6	25,940
120	33,6	30,947	120	43,6	27,183
125	35,1	32,341	125	45,6	28,437
130	36,6	33,744	130	47,6	29,703
135	38,1	35,157	135	49,7	30,979
140	39,7	36,578	140	51,7	32,266
145	41,2	38,009	145	53,8	33,565
150	42,8	39,451	150	55,9	34,876
155	44,4	40,902	155	58,0	36,198
160	46,0	42,363	160	60,2	37,534
165	47,6	43,834	165	62,3	38,881
170	49,2	45,315	170	64,5	40,242
175	50,8	46,807	175	66,7	41,616
180	52,4	48,310	180	69,0	43,005
185	54,1	49,824	185	71,2	44,408
190	55,7	51,348	190	73,5	45,825
195	57,4	52,885	195	75,8	47,257
200	59,1	54,432	200	78,1	48,706
205	60,8	55,992	205	80,4	50,171
210	62,5	57,564	210	82,8	51,654
215	64,2	59,148	215	85,2	53,154
220	65,9	60,745	220	87,7	54,673
225	67,7	62,355	225	90,1	56,212
230	69,4	63,978	230	92,6	57,772

235	71,2	65,614	235	95,2	59,353
240	73,0	67,265	240	97,7	60,958
245	74,8	68,931	245	100,3	62,587
250	76,6	70,611	250	103,0	64,242
255	78,5	72,307	255	105,7	65,925
260	80,3	74,018	260	108,4	67,638
265	82,2	75,745	265	111,2	69,385
270	84,1	77,490	270	114,1	71,166
275	86,0	79,252	275	117,0	72,986
280	87,9	81,032	280	120,0	74,850
285	89,9	82,830	285	123,1	76,761
290	91,8	84,648	290	126,2	78,727
295	93,8	86,486	295	129,5	80,757
300	95,9	88,346	300	132,9	82,861
305	97,9	90,227	305	136,4	85,055
310	100,0	92,131	310	140,1	87,364
315	102,1	94,059	315	144,0	89,824
320	104,2	96,012	320	148,3	92,509
325	106,3	97,992	325	153,3	95,589
330	108,5	100,000	330	160,3	100,000